



# 热传导/热应力 - 地铁车站火灾分析

## 1. 概要

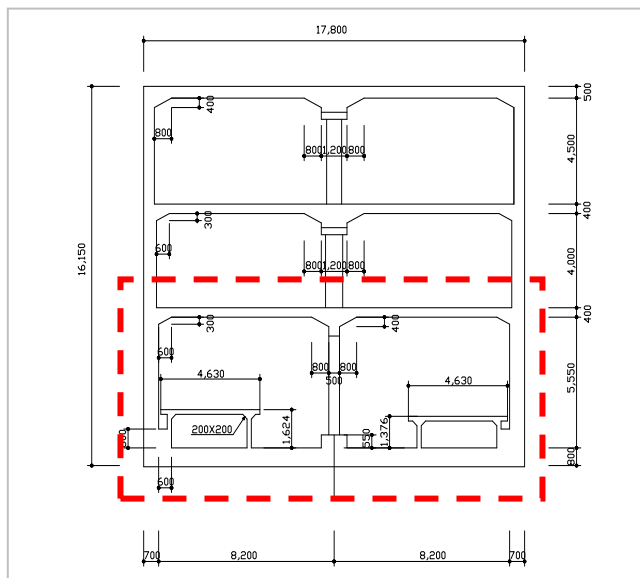
最近因为发生了一系列的火灾事故，火灾对土木结构物安全性能的影响正越来越成为结构设计人员关注的问题。结构分析中如何对火灾进行模拟，火灾后结构是否能继续工作以及火灾对结构的损伤等问题也成为结构设计研究的课题。

本例题通过对地铁车站的火灾分析，介绍了通过热传导分析获得结构内温度分布以及温度应力的分布状况，预测火灾造成的结构损伤的方法。

## 2. 结构信息

### 2.1 地铁几何信息

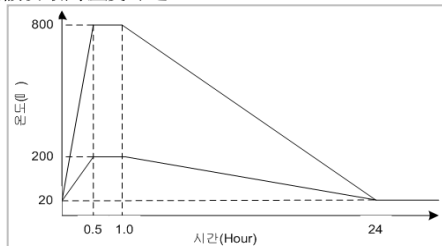
本例题的地铁如下图所示，是宽度为17.8m，总高度为16.15m的三层结构，火灾发生位置为地下第三层车站位置，所以结构模型只建了地下第三层部分。



[地铁车站剖面图]

### 2.2 分析条件

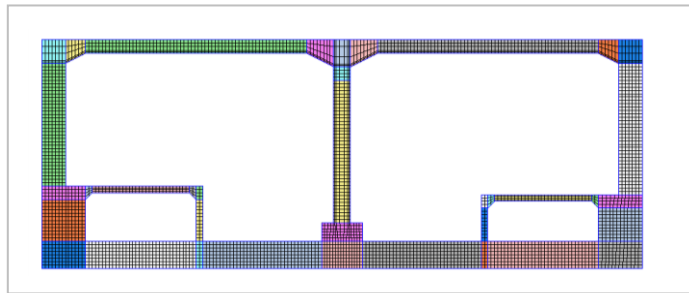
对火灾的模拟如下。假设火源作用在地铁顶板位置，顶板受火源的直接影响，其它位置受间接的影响。火源位置的顶板温度从发生火灾开始30分钟内达到最高温度800℃，在持续最高温度30分钟后24小时内逐渐熄灭。受间接影响的位置假设最高温度可达200℃。



[火灾发生以及持续时间]

## 3. 模型

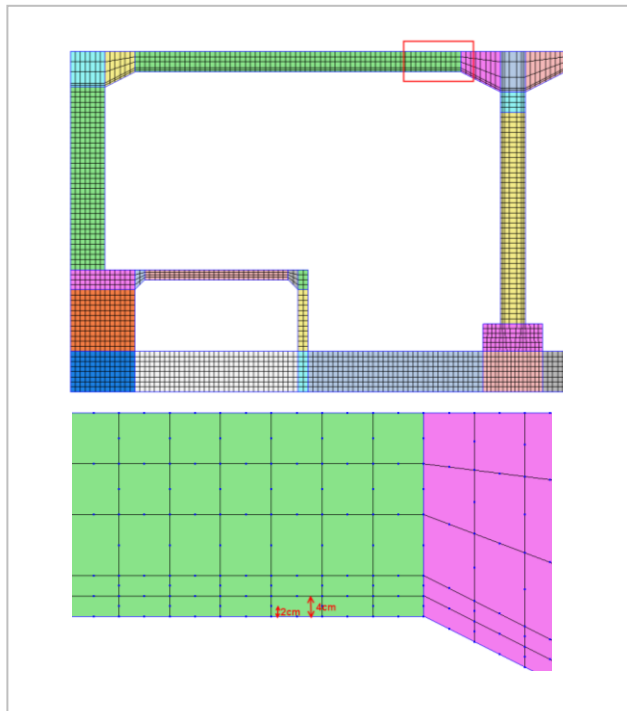
因为地铁沿纵向截面相同，所以采用了简化的二维模型，单元采用了高阶平面应变单元。



[火灾分析有限元模型]

### 3.1 建模注意事项

因为要研究火源位置温度结构物深度上的变化，所以火源位置的单元要划分得很细，本模型中单元尺寸为4cm，并采用了高阶单元，这样节点间距为2cm。



[三维模型细部网格]

### 3.2 材料和截面

混凝土的材料特性会随温度的变化而变，各种大气温度下的混凝土材料特性如下表所示。本例题只考虑了弹性模量、热膨胀系数、热传导率等参数随温度的变化。

- (1) 据文献中记载，混凝土的弹性模量随温度的上升会降低，在300℃下弹性模量降低约50%，500℃时降低约80%。本例题中各温度下的弹性模量取下列表中数值。

| 温度(℃)                    | 20  | 70  | 300  | 600 | 850 |
|--------------------------|-----|-----|------|-----|-----|
| 弹性模量( $\times 10^4$ MPa) | 2.5 | 2.5 | 1.25 | 0.9 | 0.6 |

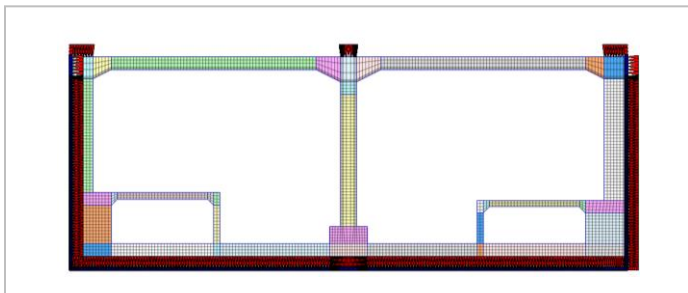
- (2) 混凝土的热膨胀系数随温度的增加有加大的趋势，当400℃以上时约增加1倍，本例题中采用的各温度下的热膨胀系数如下表所示。

| 特 性                       | 温度(℃) |    |     |     |     |     |
|---------------------------|-------|----|-----|-----|-----|-----|
|                           | 20    | 70 | 300 | 500 | 600 | 850 |
| 热膨胀系数( $\times 10^{-6}$ ) | 10    | 10 | 10  | 20  | 20  | 20  |

### 3.3 边界条件和荷载

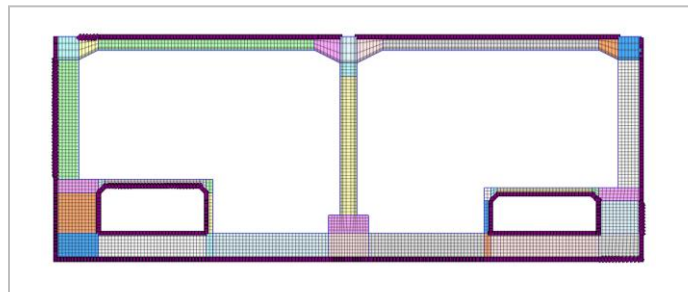
分析时使用的边界有结构物的支点和对流边界条件，另外因为分析模型是二维模型，需要选择在XZ平面上的二维分析。

- (1) 结构的支点定义如下图所示，在结构的两边和底边与土接触的位置设置支点。另外只模拟了地下第三层的模型，为了反应上部两层的结构的影响，在与上部连接的位置另外定义了一些约束条件。



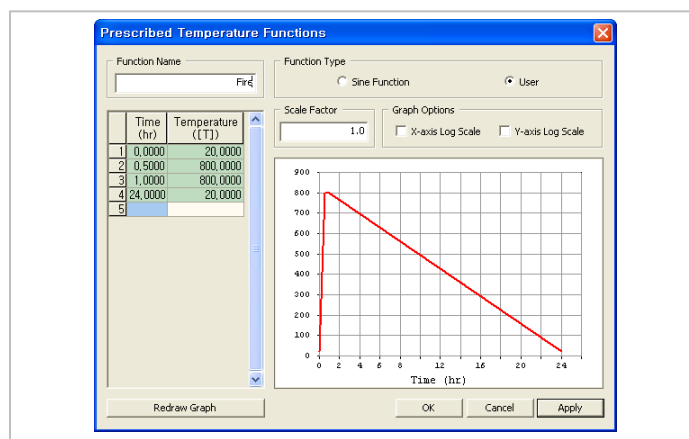
[结构的位移约束条件]

- (2) 对流边界条件定义在与外部接触的表面，对与地面接触的底板下部、两边墙体的外表面、顶板与大气接触的表面分别定义了对流系数，大气温度均定义为20℃。

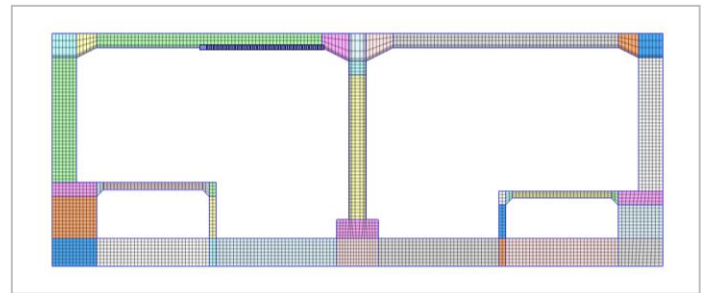


[底板、墙、顶板等与大气接触的对流边界]

- (3) 定义直接承受火灾部位的温度作用，使用 midas FEA中的固定温度功能模拟火源部位的温度。

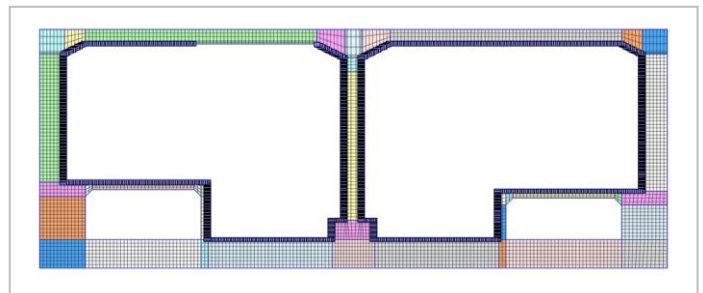


[随时间变化的温度函数]



[直接承受火灾的火源部位]

- (4) 定义间接承受火灾部位的温度作用。将结构内表面除火源部位以外的位置均定义为间接承受火灾的部位



[间接承受火灾的部位]

## 4. 分析结果

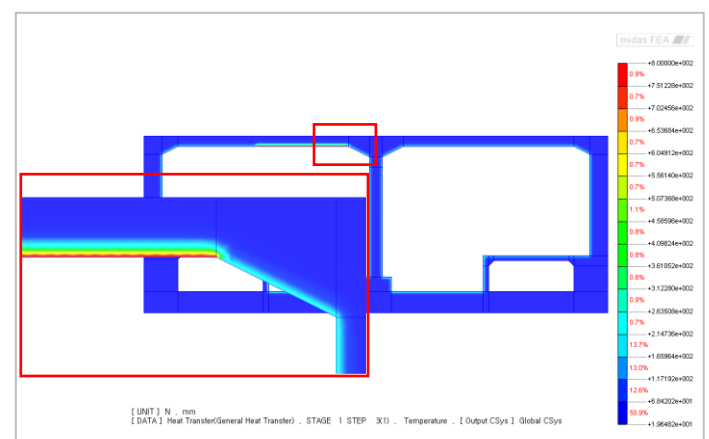
火灾分析及结果验算大致分为下面两个部分。

首先要确认火灾引起的温度分布，有些国家的设计规范中提供了混凝土和钢筋的强度随温度变化的曲线，所以可以通过各位置的温度决定各位置的强度，从而验算各位置的截面是否安全。

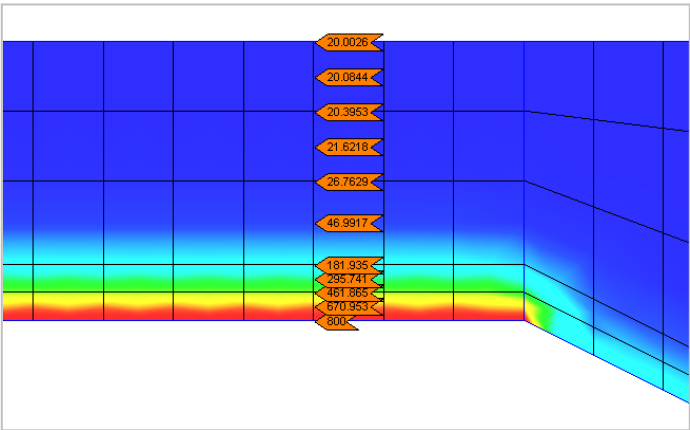
另外就是根据热传导分析获得的温度的分布进行热应力分析，确认各位置的热应力状态。在高温作用下因为材料特性的变化，各部位会发生较大的应力，如果不做热应力分析，结构会偏于不安全。

### 4.1 温度分布

- (1) 首先确认火源位置的温度分布，因为火源在1小时后达到最高温度，所以查看了火灾发生1小时后的温度分布情况。



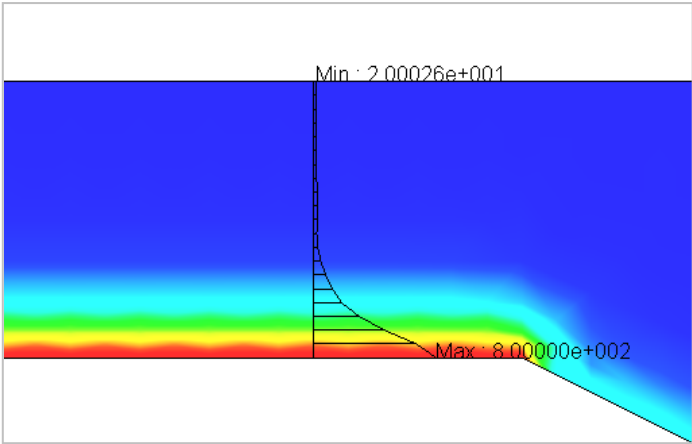
[发生火灾1小时后的温度分布云图]



[发生火灾1小时后顶板厚度方向温度结果]

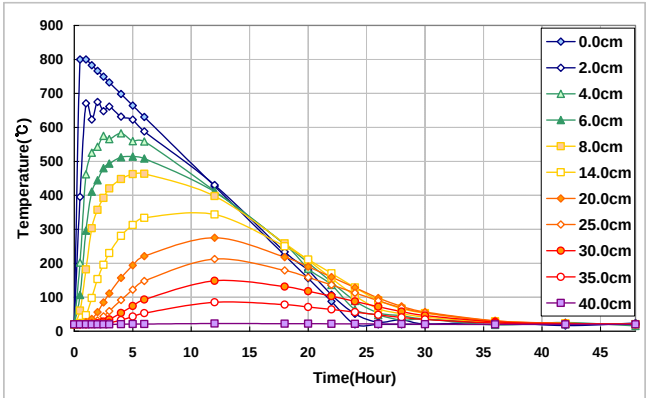
如上图所示，火源位置混凝土温度为800℃，沿着板厚方向温度在逐渐减小。从温度云图中可以看出从火源位置表面到沿板厚14cm的位置，温度在急剧下降，此后温度的变化不大。一般来说板的钢筋保护层厚度在15cm左右，所以此时钢筋的温度也会较高，钢筋的强度也会有较大的降低，而钢筋强度的降低会引起构件的承载能力的降低。如果火源位置在构件的受压部位的话，受压区混凝土强度的降低将造成截面的承载能力的降低。如下图所示沿厚度方向的温度变化呈非线性变化。

| 厚度 (cm) | 温度 (℃)  |
|---------|---------|
| 0.0     | 800     |
| 2.0     | 670.953 |
| 4.0     | 461.865 |
| 6.0     | 295.741 |
| 8.0     | 181.935 |
| 14.0    | 46.9917 |
| 20.0    | 26.7629 |
| 25.0    | 21.6218 |
| 30.0    | 20.3953 |
| 35.0    | 20.0844 |
| 40.0    | 20.0026 |

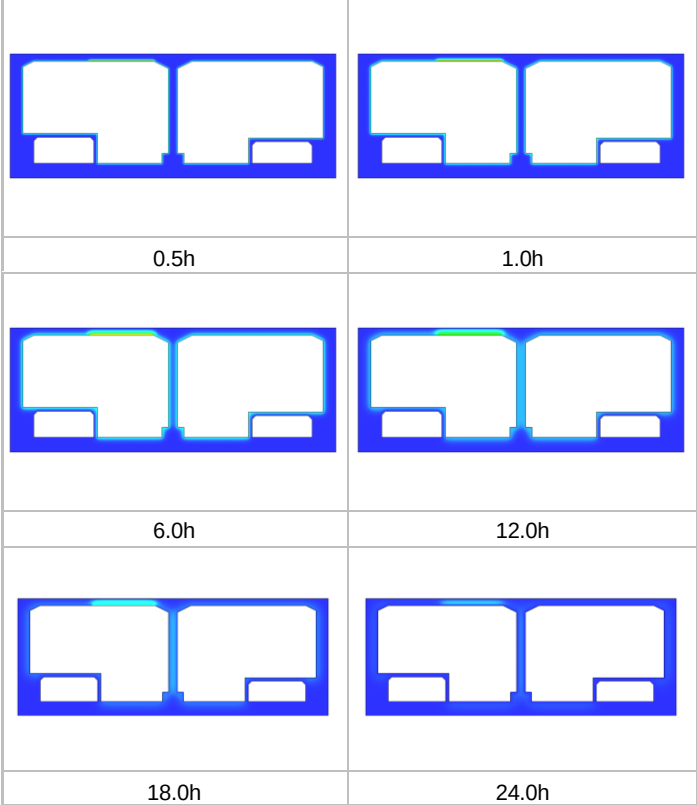


[发生火灾1小时后温度沿板厚的分布]

(2) 下面查看厚度方向上各点的温度随时间的变化。如下图所示，越接近火灾表面，温度的变化历程与火源温度的变化越接近；离火源越远，发生最高温度的时间延迟越长。



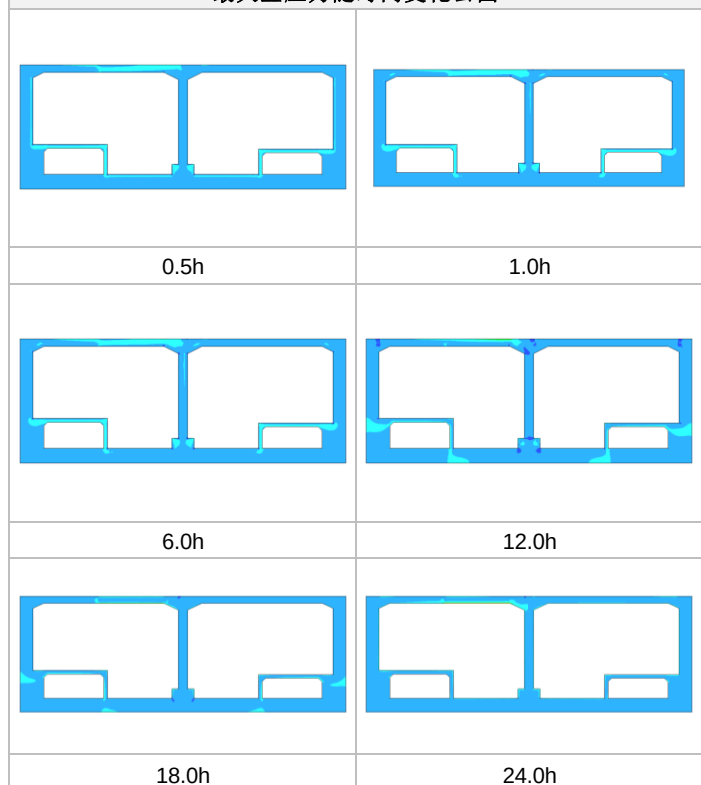
随时间变化的温度分布云图



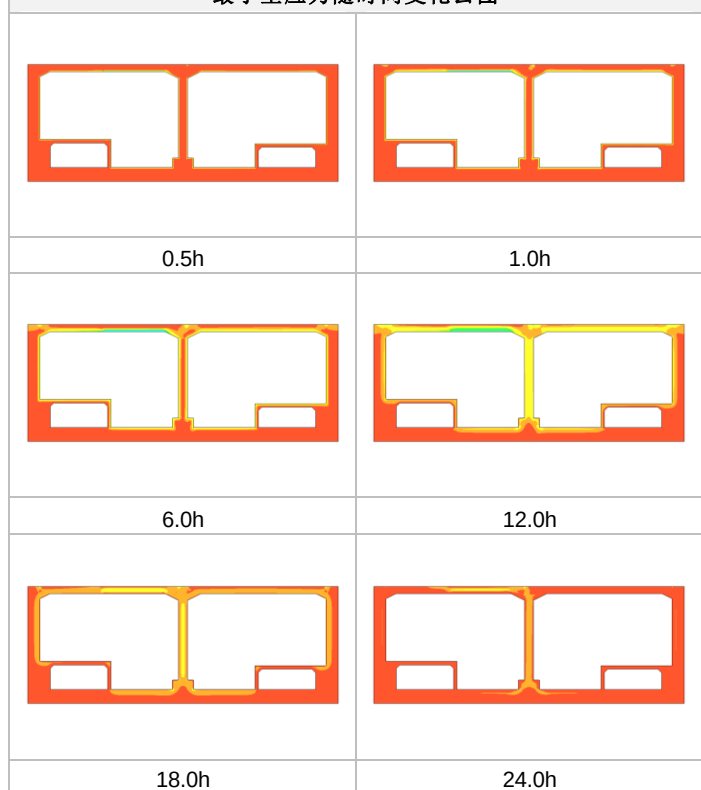
4.2 应力计算

火灾引起的温度上升造成了结构的变形，结构的变形使结构产生了应力，下图为温度应力分布随时间的变化云图。

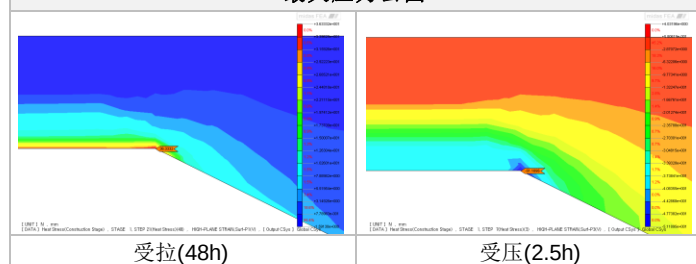
最大主应力随时间变化云图



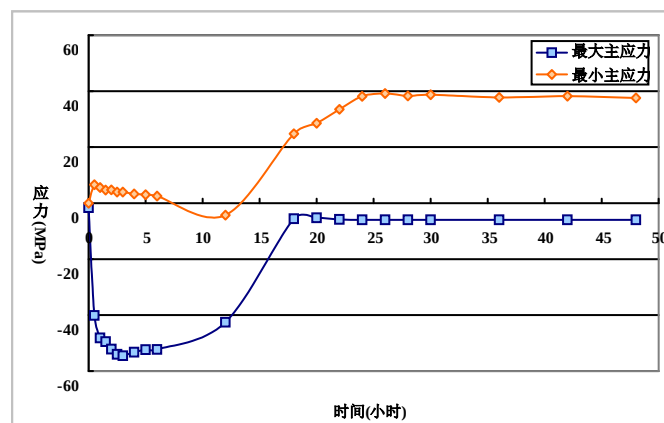
最小主应力随时间变化云图



最大应力云图



如上图所示, 加腋处最大主应力(最大拉应力)为36.33MPa, 发生在火灾后期, 最小主应力(最大压应力)-51.19MPa, 发生在火灾初期。



[加腋位置最大与最小主应力随时间变化曲线]

从上面曲线可以看出, 火灾初期加腋位置承受较大的压应力, 随着温度的下降结构会发生收缩, 又发生了较大的拉应力。

从分析结果看, 发生的最大拉应力和最大压应力都比较大, 远远超出了混凝土的强度, 这是因为结构分析采用了线性分析。为了更准确地反应结构材料的非线性特点, 需要做材料非线性分析。即便如此, 从线性分析中可以看出在火灾初期将发生较大应力, 在设计时应充分考虑火灾对结构强度和承载能力的影响。

## 5. 结论

通过本例题, 我们介绍了通过热传导和热应力分析确定火灾引起的结构温度分布和应力变化。

从分析结果上看, 距离火灾表面20cm以内的混凝土的强度损伤较大, 结构设计时对此应有充分的对策。

另外, 从热应力分析结果上看, 加腋位置应力集中现象较为严重, 这是因为高温引起的变形及周边结构的约束造成的。

